(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
29. März 2012 (29.03.2012)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/038432 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
C30B 11/00 (2006.01) *H01L 31/18* (2006.01)
C30B 30/04 (2006.01) *C30B 35/00* (2006.01)
C30B 28/06 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/066332

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. September 2011 (20.09.2011)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2010 041 061.6
20. September 2010 (20.09.2010) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V.** [DE/DE]; Rudower Chaussee 17, 12489 Berlin (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **DROPKA, Natascha** [DE/DE]; Halskestraße 4, 12167 Berlin (DE). **FRANK-ROTSCH, Christiane** [DE/DE]; Lindenallee 13, 16727 Oberkrämer / OT Vehlefanz (DE). **RUDOLPH, Peter** [DE/DE]; Helga-Hahnemann-Str. 56, 12529 Schönefeld (DE). **LANGE, Ralph-Peter** [DE/DE]; Förstersteg 18B, 17039 Wulkenzin (DE). **REHSE, Uwe** [DE/DE]; Havelkorso 69, 16515 Oranienburg (DE).

(74) Anwalt: **NEIGENFINK, J.**; GULDE HENGELHAUPT ZIEBIG & SCHNEIDER PATENTANWÄLTE - RECHTSANWÄLTE, Wallstraße 58/59, 10179 Berlin (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: CRYSTALLIZATION SYSTEM AND CRYSTALLIZATION PROCESS FOR PRODUCING A BLOCK FROM A MATERIAL WITH AN ELECTRICALLY CONDUCTIVE MOLTEN MASS

(54) Bezeichnung : KRISTALLISATIONSANLAGE UND KRISTALLISATIONSVERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES BLOCKS AUS EINEM MATERIAL, DESSEN SCHMELZE ELEKTRISCH LEITEND IST

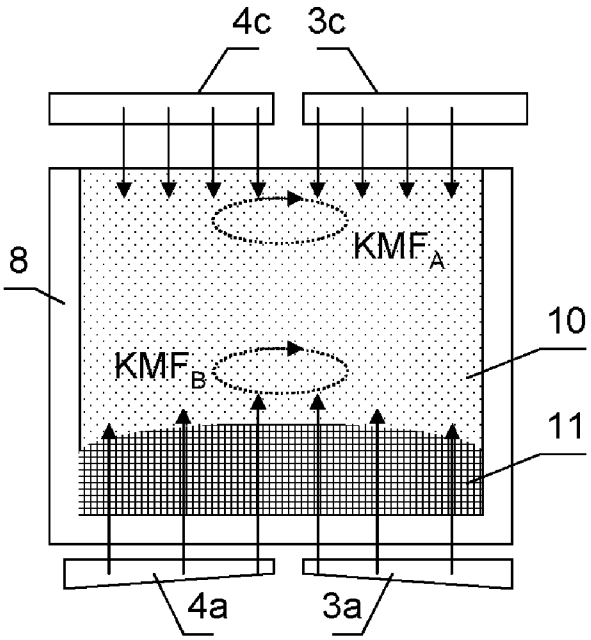


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a crystallization system for producing a block from a material with an electrically conductive molten mass, and also to an associated crystallization process. To this end, the crystallization system comprises: - a container for receiving a molten mass of the material; - a heater-magnet module, which: a) comprises a bottom heater arranged beneath the container and having a multiplicity of heater-magnet coils arranged in 3 or more heater-magnet segments, wherein the heater-magnet segments together form a base surface of the bottom heater which is available for heating the container and for generating magnetic fields, but do not have a common geometric mid-point in the base surface of the bottom heater; and/or b) comprises a top heater arranged above the container and having a multiplicity of heater-magnet coils arranged in 3 or more heater-magnet segments, wherein the heater-magnet segments together form a base surface of the top heater which is available for heating the container and for generating magnetic fields, but do not have a common geometric mid-point in the base surface of the top heater; and - a control and power supply unit, with which the heater-magnet segments can be separately assigned a predefinable current intensity, frequency and phase shift, wherein the control and power supply unit is designed to generate at least one carousel magnetic field (KMF) by sequentially assigning a predefinable current intensity, frequency and phase shift to the heater-magnet segments, in such a manner as to form a crystallization front of the molten mass with a convex contour.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/038432 A1

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Die Erfindung betrifft eine Kristallisationsanlage zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist, sowie ein dazugehöriges Kristallisationsverfahren. Die Kristallisationsanlage umfasst dazu: -einen Container zur Aufnahme einer Schmelze des Materials; -ein Heizer-Magnet-Modul, das : a) einen unterhalb des Containers angeordneten Bodenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Bodenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Bodenheizers besitzen; und/oder b) einen oberhalb des Containers angeordneten Deckenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Deckenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Deckenheizers besitzen; und - eine Steuer- und Stromversorgungseinheit, mit der die Heizer-Magnet-Segmente separat mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung belegbar sind, wobei die Steuer-und Stromversorgungseinheit ausgelegt ist, wenigstens ein Karussell-Magnetfeld (KMF) durch sequentielle Belegung der Heizer- Magnet-Segmente mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung zu erzeugen, derart, dasseine Kristallisationsfront der Schmelze mit konvexer Kontur entsteht.

Kristallisationsanlage und Kristallisationsverfahren zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist

Die Erfindung betrifft eine Kristallisationsanlage zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist, sowie ein dazugehöriges Kristallisationsverfahren.

Stand der Technik und Hintergrund der Erfindung

Die gerichtete Erstarrung von Ingots aus verschiedenen Materialien besitzt heute eine zentrale Bedeutung in der Metallurgie, Halbleitertechnik, Optik und Photovoltaik. Allein ca. die Hälfte des gesamten Solarzellensiliziums wird aus solchen Blöcken gewonnen, die durch Normalerstarrung einer Schmelze von unten nach oben in rechteckigen Gefäßen (Containern) in einem vertikalen Temperaturgradienten mit einer bestimmten Wachstumsrate hergestellt werden (K. Nakajima, N. Usami (Eds.), Crystal Growth of Si for Solar Cells, Springer, Berlin, Heidelberg 2009). Je nachdem ob der Container abwärts durch einen konstanten Temperaturgradienten bewegt wird oder ob der Gradient elektronisch kontrolliert durch einen ruhenden Schmelzcontainer wandert oder die fortschreitende Kühlung am Boden durch ein Kühlfluid mit gleichbleibender oder zunehmender Strömungsrate abläuft, unterscheidet man das zu Grunde liegende Züchtungsverfahren in Bridgmanverfahren, Vertical Gradient Freeze (VGF) oder Heater Exchange Method (HEM), respektive (J.C. Brice, P. Rudolph, Crystal Growth in: Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 10, Wiley-VCH, Weinheim 2003 and 2007, p. 47 - 98).

Da es sich bei all diesen Verfahren um thermisch stabile Schichtungen handelt (unten „kalt“ oben „heiß“), ist die natürliche Konvektion nicht sonderlich ausgeprägt. In Folge dessen bildet sich vor der fortschreitenden fest-flüssig Phasengrenze eine segregationsbedingte Anreicherungsschicht der Restverunreinigungen und Überschusskomponenten, die auch als Diffusionsgrenzschicht bezeichnet wird (K.-Th. Wilke, J. Bohm, Kristallzüchtung, Vlg. Harri Deutsch-Thun, Frankfurt/M., 1988). Überschreitet die Konzentration in diesem Gebiet einen kritischen Wert, ist die für einen erfolgreichen Kristallisationsprozess erforderliche Ebenheit der Phasengrenze gefährdet. Es entsteht eine morphologische Instabilität mit zellularem oder dendritischem Wachstum. Gleichzeitig können sich in dieser Schicht Fremdphasenpartikel bilden, wenn die angehäuften Verunreinigungen miteinander chemisch reagieren und die Löslichkeitsgrenzen der neuen unerwünschten Phasen überschritten

werden. Solche Verbindungen sind z.B. bei der Siliziumkristallisation SiC und Si_3N_4 (T. Buonassisi et al., J. Crystal Growth 287 (2006) 402; Liu et al., J. Crystal Growth 310 (2008) 2192), die zudem eine höhere Dichte als die Si-Schmelze besitzen und demnach zusätzlich auf der Phasengrenze sedimentieren. Sie werden sodann in die kristallisierende Phase in Form von Einschlüssen eingebaut, umso mehr, wenn die Phasengrenze eine zellulare Morphologie besitzt. SiC- und Si_3N_4-Partikel bilden heute im so gewonnenen Solarsilizium die gefährlichsten Quellen für strukturelle Defekte und Kurzschlüsse in der Solarzelle. Ihre Einbaurate und -dichte nimmt zum oberen Ende des Ingots hin zu, da mit fortschreitender Kristallisation die Segregation zur stetigen Konzentrationserhöhung von Stickstoff und Kohlenstoff in der Schmelze führt. Somit kommt es besonders in der zweiten Hälfte des Normalerstarrungsprozesses zur erhöhten Ausscheidungsbildung im gesamten Schmelzvolumen und zwar bereits oberhalb der Diffusionsgrenzschicht.

Die effektivste Maßnahme zum Abbau der Diffusionsgrenzschicht ist eine stetige homogene Durchmischung der Schmelze. Dazu ist die kaum stattfindende natürliche Auftriebskonvektion in einem Normalerstarrungsprozess von unten nach oben nicht in der Lage. Im Gegenteil, wegen ihrer niederfrequenten Strömungsfluktuationen verstärken sie einen inhomogenen Einbau der Fremdphasen in den Ingot (F. Rosenberger, Fundamentals of Crystal Growth I, Springer, Berlin 1979). Homogene Durchmischungen elektrisch leitender Schmelzen sind insbesondere mit instationären Magnetfeldern möglich. Dabei zeigen longitudinale Wanderfelder (Travelling Magnetic Fields - TMF) gegenüber azimutal rotierenden (Rotating Magnetic Fields - RMF) eine höhere Mischungsintensität und Volumenausnutzung (S. Eckert et al., Int. J. Cast Metals Res. 22 (2009) 78).

Bekannt ist die Verwendung von TMF beim vertikalen Bridgman- bzw. Vertical Gradient Freeze-Verfahren, wobei das Magnetfeld entweder separat vom Heizer außerhalb des Züchtungsgefäßes (R. Lantzsch et al., J. Crystal Growth 305 (2007) 249) oder gleichzeitig in einem spulenförmigen Heizer in unmittelbarer Nähe des Schmelzcontainers erzeugt wird (Ch. Frank-Rotsch, P. Rudolph, J. Crystal Growth 311 (2009) 2294, DE 10349339, DE 10 2007 020 239, DE 10 2007 028 547, DE 10 2007 028 548). Letztere Variante ist energetisch und ökonomisch klar bevorteilt (P. Rudolph, J. Crystal Growth 310 (2008) 1298). Erst seit 2009 wird der Einsatz solcher kombinierten Heizer-Magnet-Module bei der Kristallisation von Solarsilizium in rechteckigen Containern analysiert (N. Dropka, J. Crystal Growth, 312 (2010) 1407; M. Zschorsch et al., 3rd Intern. Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells, Sintef/ NTNU, Trondheim 2009, p. 1; electronic release).

Die Entwicklung der Produktionsanlagen geht allerdings zu größeren Grundflächen bei reduzierten oder gleichbleibenden Schmelzhöhen hin, so dass es auf Grund der

beschränkten Eindringtiefe des seitlich induzierten Magnetfeldes und der Verteilung des Magnetfeldes (Konzentration der Kraft in Randnähe und Abnahme zum Tiegelzentrum) nicht mehr möglich ist, die Durchmischung und die Form der Kristallisationsfront effektiv zu beeinflussen.

In letzter Zeit werden besonders in metallurgischen Prozessen Magnetfelder zunehmend auch zur Fernhaltung von Schwimmpartikeln von der kristallisierenden Phasengrenze und Anhäufung in weniger kritischen Gebieten, wie an der Schmelzoberfläche oder Containerwandung verwendet (Proceedings 6th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials, EPM 2009, FZ Dresden-Rossendorf, 2009). Seit kurzem wird auch der Einsatz von TMF zur SiC- und Si3N4-Partikelseparation bei der Kristallisation von Solarsilizium diskutiert (K. Dadzis et al., in Proc. EPM 2009, FZ Dresden-Rossendorf 2009, p. 887). Nachteilig ist jedoch, dass bei Verwendung eines üblichen seitlich einkoppelnden Wanderfeldes ein Strömungstoroid entsteht, der je nach Feldrichtung entweder an der Wand oder im Zentrum abwärts verlaufende Strömungen ausbildet, die die Partikel zur Phasengrenze hin mitnehmen können. Strömungstoroide gibt es nur im zylindrischen Container, bei rechteckigen Gefäßen ohne Magnetfeld gibt es einen zentrierten Strömungswirbel, bei rechteckigen Gefäßen mit TMF gibt es mehrere nicht zentrierte vertikale Strömungswirbel. Außerdem häufen sich bekanntlich im zentralen Ruhegebiet („Totwasserzone“) zwischen den Konvektionsrollen die Schwimmpartikel an (M. Kirpo et al., in Proc. EPM 2009, FZ Dresden-Rossendorf 2009, p. 553), weshalb sie nach unten sinken und somit im Zentrum der Phasengrenze nach wie vor sedimentieren können.

Rotierende oder wandernde Magnetfelder kommen in metallurgischen Prozessen, wie dem Stranggießen von Stahl zum Einsatz. Zum Beispiel ist eine Anordnung einer mehrphasigen elektromagnetischen Wicklung zur Erzeugung eines Wanderfeldes senkrecht zur Gießrichtung an einer Stranggießanlage in der Druckschrift DE AS 1 962 341 beschrieben.

Ein anderes Verfahren zum Rühren der Stahlschmelze beim Stranggießen ist in der Druckschrift US 2003/0106667 beschrieben, bei dem zwei übereinander angeordnete und gegenläufig rotierende Magnetfelder eingesetzt werden. Während das untere Magnetfeld die eigentliche Funktion des Rührers übernimmt, kommt dem oberen Magnetfeld die Aufgabe zu, die rotierende Schmelze im Bereich der freien Oberfläche auf sehr kleine Geschwindigkeitswerte abzubremsen, um die negativen Auswirkungen des Rührens – eine Auslenkung und Verwirbelung der freien Oberfläche – zu kompensieren.

Weitere Verfahren zum elektromagnetischen Rühren in Stranggusskokillen sind in den Druckschriften DE 2 401 145 und DE 3 730 300 beschrieben, bei denen eine periodische Änderung des Stromes in der Spulenanordnung vorgenommen wird. In der Druckschrift DE 2

401 145 ist beschrieben, dass mit der periodischen Änderung die Ausbildung von sekundären Weißbändern und Sekundärdendriten vermieden werden kann. In der Druckschrift DE 3 730 300 ist ein Verfahren zur Beruhigung der freien Badoberfläche beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass das resultierende Magnetfeld im Innern der Schmelze gleichzeitig eine intensive Rührbewegung aufrechterhält. In den beiden genannten Druckschriften werden für die Zykluszeiten, in denen die Stromrichtung gewechselt werden soll, sehr weite Bereiche, namentlich zwischen 1 und 30 s angegeben. Diese Zykluszeit oder Periodendauer bzw. die Frequenz des Vorzeichenwechsels des Stroms ist ein wichtiger Parameter mit großem Einfluss auf die sich ausbildende Strömung. Beide Druckschriften geben aber keine Vorgaben hinsichtlich einer Periodendauer in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke, der Geometrie der Anordnung oder den Materialeigenschaften der Metallschmelze an.

Eine Einrichtung und ein Verfahren zum intensiven Rühren einer in einem zylindrischen Behälter befindlichen Schmelze, bei dem ein rotierendes Magnetfeld und ein wanderndes Magnetfeld gleichzeitig eingesetzt werden, sind in der Druckschrift JP 2003 220323 beschrieben. Das rotierende Magnetfeld wird von den den Behälter umgebenden vertikal über den Umfang verteilten Stromschleifen (Radialspulen) erzeugt. Das wandernde Magnetfeld wird von einer Längsspule, deren Windungen sich in einer axialen Richtung mantelabschnittsweise ausdehnen und insgesamt ringförmig den Behältermantel umgeben, erzeugt, wobei die Längsspule zwischen dem Behältermantel und der Radialspule angeordnet ist. Die Radialspule erzeugt eine Rotationsbewegung und die Längsspule erzeugt eine Axialbewegung der flüssigen Schmelze im Behälter. Die gleichzeitige Überlagerung beider Felder erzeugt eine resultierende stationäre Kraft, die charakteristische und je nach Parameterwahl unter Umständen auch unsymmetrische Strömungsstrukturen hervorruft. Für die Erstarrung bedeutet dies, dass an der Erstarrungsfront Strömungen dominieren, die im zeitlichen Mittel einen Stofftransport in bevorzugte Richtungen und damit Entmischungen verursachen.

DE 10 2007 038 281 B4 beschreibt ein Verfahren und eine Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten unter Verwendung eines horizontaler Ebene rotierenden Magnetfeldes und eines dazu in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes. Die Lösung besteht darin, dass sowohl das rotierende Magnetfeld RMF als auch das wandernde Magnetfeld WMF diskontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten und einstellbaren Periodendauern und abwechselnd zeitlich nacheinander zugeschaltet wird.

WO 2008/155137 betrifft eine Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer angeordneten, eine Schmelze enthaltenen Tiegel mit einem Tiegelboden, eine den Tiegel umgebende Heizeinrichtung, welche als Mehrspulenanordnung von übereinander angeordneten Spulen ausgeführt ist und zur gleichzeitigen Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes dient, wobei die Spulen elektrisch mit mindestens einer außerhalb der Züchtungskammer angeordneten Energieversorgungseinrichtung über durch die Züchtungskammer geführte Spulenanschlüsse elektrisch verbunden sind. Es ist vorgesehen, dass Windungen der Mehrspulenanordnung einen Abstand von einer gedachten Tiegelmittelachse zum Innenrand der Windungen aufweisen, der mindestens bei einer Windung verschieden von den übrigen Windungen bei gleichem oder verschiedenen Windungsquerschnitten ist. Weiterhin ist ein Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen vorgesehen. Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitende Schmelzen bereitzustellen, bei der eine effektivere Einkopplung von Lorentzkräften in die Schmelze ermöglicht und dadurch eine wirkungsvollere Eindämmung der Auftriebskonvektion in der Schmelze erreicht wird und womit die Perfektion der herzustellenden Kristalle verbessert wird. Eine solche Vorrichtung soll zudem einfach handhabbar und in bestehende Züchtungsanlagen ohne aufwendige Nachrüstung einbaubar sein.

In DE 103 49 339 A1 wird eine Vorrichtung beschrieben, bei der die Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes von oben nach unten (oder umgekehrt) innerhalb des im Hochdruckkessel angeordneten Widerstandsheizers erfolgt. In DE 103 49 339 A1 wird die Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes von oben nach unten (oder umgekehrt) innerhalb des im Hochdruckkessel angeordneten Widerstandsheizers beschrieben, indem der zur Beheizung notwendige RST-Drehstrom in drei übereinander angeordneten Spulensegmenten zugleich ein longitudinal wanderndes Magnetfeld erzeugt. Mit dieser Lösung soll die Eindämmung der natürlichen Konvektionsflüsse, ihrer Fluktuationen und die Kontrolle der Form der Phasengrenze erreicht werden.

In DE 101 02 126 A1 wird auf eine Spulenanordnung verwiesen, die sowohl Heizen als auch ein Wandermagnetfeld erzeugen kann.

Eine ähnliche derart aufsteigende (spiralförmige) Windungsform des Heizers wird auch in DE 21 07 646 beschrieben. Dazu wird ein hohlzylindrischer Graphitkörper spiralförmig von unten nach oben geschlitzt, so dass der Heizer aus drei nebeneinander spiralförmig aufsteigenden (verdrillten) Spulen besteht, durch die ein Dreiphasenstrom bestimmter Frequenz und Phasenverschiebung geleitet wird.

Von Hoshikawa et al. [Jpn. J. Appl. Phys. 19 (1980) 133] und in EP 0 247 297 wurde ein zylindrischer Graphitheizer in drei das gleiche Bogenmaß einnehmende Heizsegmente mit identisch ausgerichteter Stromflussbahn aufgeteilt. Diese wurden sodann über eine Dreieckschaltung mit einem Dreiphasenwechselstrom gespeist. Durch die Phasenverschiebung der Drehstromanteile entstand ein transversal rotierendes Magnetfeld, welches in der elektrisch leitenden Schmelze eine umlaufende Lorentzkraft erzeugte, die ihrerseits deren Rotation ohne Tiegeldrehung bewirkte. Nachteilig ist jedoch, dass eine Kontrolle der Form der Phasengrenze mittels Beeinflussung der konvektiven Vertikalströme nicht erreicht wird.

Von Ciscato et al. [Ciscato D.,Dughiero F., Forzan M., EPM 2009, *A Comparison between resistance and induction DSS furnace for SoGSi production*] wurde auf eine Spulenanordnung in Boden- und Deckel-Induktionsheizung in Si-Ingot-Anlagen verwiesen die sowohl Heizen und kühlen kann. Die Spulen werden mit AC Strom mit Hochfrequenz (2 kHz) und ohne eine Phasenverschiebung gespeist und sind damit für die Mischung der Schmelze und die Beeinflussung der Form der Phasengrenze ungeeignet.

In DE 10 2008 039 457 A1 wird auch eine Vorrichtung vorgestellt bei der Induktionsheizung zur Erwärmung der Schmelze zum Einsatz kommt. Diese Anordnung ermöglicht auch einen Wärmeaustausch während der Kristallisation, diese ist aber abweichend zur vorliegenden Erfindung in keiner Weise zur gezielten Beeinflussung der Strömung in der Schmelze und damit der Phasengrenzform geeignet.

Es besteht weiterhin Bedarf an Kristallisationsanlagen und Kristallisationsverfahren, bei denen mit Hilfe von magnetischen Wanderfeldern, die in Heizer-Magnet-Modulen in unmittelbarer Nähe der Schmelze erzeugt werden, eine intensive homogene Durchmischung entsteht, um die Diffusionsgrenzschicht mit Fremdpartikeln an der Fest-Flüssig-Phasengrenze gleichmäßig abzubauen. Fernhaltung und damit Verhinderung des Einbaus von Fremdpartikeln an der Fest-Flüssig-Phasengrenze, wie Präzipitaten und Einschlüssen aus Fremdphasen sowie Gasbläschen, ermöglichen eine höhere Materialhomogenität und Ausbeute frei von Quellen für Versetzungsbildung und elektrische Kurzschlüsse. Das Kristallisationsverfahren sollte eine Strömungsform erzeugen, die eine leicht konvexe Phasengrenze, insbesondere für solche Kristallisationscontainer gewährleistet, deren Höhe sehr viel geringer als die Breite beziehungsweise der Durchmesser ist. Gerade bei solchen Kristallisationscontainern können Lorentzkräfte aus Seitenmagnetmodulen auf Grund der beschränkten Eindringtiefe die Schmelze in der Tiegelmitte nicht erreichen.

Zusammenfassung der Erfindung

Ein oder mehrere der angesprochenen Probleme des Standes der Technik werden mit Hilfe der erfindungsgemäßen Kristallisationsanlage zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist, gelöst oder zumindest gemindert. Die Kristallisationsanlage umfasst dazu:

- einen Container zur Aufnahme einer Schmelze des Materials;
- ein Heizer-Magnet-Modul, das

  a) einen unterhalb des Containers angeordneten Bodenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Bodenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Bodenheizers besitzen;

  und/oder

  b) einen oberhalb des Containers angeordneten Deckenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Deckenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Deckenheizers besitzen; und
- eine Steuer- und Stromversorgungseinheit, mit der die Heizer-Magnet-Segmente separat mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung belegbar sind, wobei die Steuer- und Stromversorgungseinheit ausgelegt ist, wenigstens ein Karussell-Magnetfeld (KMF) durch sequentielle Belegung der Heizer-Magnet-Segmente mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung zu erzeugen, derart, dass eine Kristallisationsfront der Schmelze mit (leicht) konvexer Kontur entsteht.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass ein segmentierter Aufbau des Bodenheizers beziehungsweise Deckenheizers des Heizer-Magnet-Moduls eine verbesserte Steuerung des Kristallisationsprozesses insbesondere für Container mit sehr großer Breite und Durchmesser ermöglicht, bei denen Seitenmagnetmodule nicht mehr die erforderliche Eindringtiefe in die Schmelze erlauben. Der Bodenheizer beziehungsweise Deckenheizer

besteht aus drei oder mehrer Heizer-Magnet-Segmenten. Auf jedem Segment sind ein oder mehrere Heizer-Magnet-Spiralen angeordnet, die in der Regel der durch die Segmente vorgegebenen Kontur folgen. Die Heizer-Magnet-Spiralen aus verschiedenen Segmenten werden getrennt voneinander über eine Steuer- und Stromversorgungseinheit angesteuert, dass heißt, für jedes Segment sind Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung individuell vorgebbar. Die Segmente des Heizers ergeben zusammengesetzt die gesamte Grundfläche des Heizers, die zum Beheizen/Erzeugen eines magnetischen Wanderfeldes genutzt wird. Die Segmente haben jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Heizers. Mit anderen Worten, die Segmente sind nicht konzentrisch um eine Achse angeordnet, die durch den Mittelpunkt des Boden- beziehungsweise Deckenheizers und Containers geht. Mit Hilfe der Steuer- der Stromversorgungseinheit werden die Heizer-Magnet-Spiralen auf den einzelnen Segmenten derart angesteuert, dass ein in der Schmelze zirkulierendes magnetisches Wanderfeld erzeugt wird, welches wiederum eine Kristallisationsfront der Schmelze mit (leicht) konvexer Kontur bedingt. Eine W-Form der Kristallisationsfront, die typisch bei der Verwendung von Seitenmagnetheizern und nach unten gerichteten Lorentzkräften ist, kann auf diese Weise vermieden werden. Das Verfahren eignet sich sowohl für zylindrische, rechteckige als auch alle anderen polygonalen Container.

Der Boden- beziehungsweise Deckenheizer ist aus drei oder mehr Segmenten aufgebaut. Dieser modulare Aufbau hat auch den Vorteil, dass der Heizer durch Aufnahme/Austausch/Wegnahme von Segmenten an gegebenenfalls variierende Tiegelgrößen oder -konturen angepasst werden kann. In der Regel sollte die Form der Grundfläche des Heizers der Grundform des Containers entsprechen, dass heißt, für zylindrische Container sind Heizer mit einer zylindrischen Grundfläche und für rechteckige Container sind Heizer mit entsprechend rechteckiger Grundfläche bevorzugt.

Der hier verwendete Begriff Karussell-Magnetfeld (KMF) bezeichnet ein nichtstationäres Magnetfeld, welches vergleichbar mit einem magnetischen Drehfeld ist, sich jedoch in einer Ebene ober- und unterhalb der Schmelze und nicht peripherisch um diese herumdreht und die vertikal gerichteten Lorentzkräfte erzeugt, die sich um eine zentrale vertikale Achse der Schmelze herumdrehen.
Vorzugsweise nimmt eine Querschnittsfläche einer Heizer-Magnet-Spirale innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments vom Mittelpunkt des Containers in radialer Richtung zu. Mit anderen Worten, der Querschnitt der Heizer-Magnet-Spiralen vergrößert sich in einem Segment von innen nach außen.

Alternativ zu vorgenannter Ausführungsform sind die Querschnittsflächen der Heizer-Magnet-Spiralen innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments vorzugsweise konstant und die Querschnittsflächen von Heizer-Magnet-Spiralen verschiedener Heizer-Magnet-Segmente nehmen vom Mittelpunkt des Containers in radialer Richtung zu. Gemäß dieser Ausführungsform nehmen also nicht die Querschnittsflächen in den einzelnen Heizermagnetspulen innerhalb eines einzigen Segments zu. Der Querschnitt der Heizer-Magnet-Spiralen ist jedoch umso größer, je weiter außen das Segment in der Grundfläche des Heizers angeordnet ist.

Schließlich können die Querschnittsflächen der Heizer-Magnet-Spiralen innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments konstant sein und die Heizer-Magnet-Spiralen derart im Heizer-Magnet-Segment angeordnet werden, dass ein Abstand der Heizer-Magnet-Spiralen zum Container vom Mittelpunkt des Containers in radialer Richtung zunimmt. Mit anderen Worten, die Heizer-Magnet-Spiralen sind mit einer vorgebbaren Neigung zum Containerboden angeordnet, wobei der Abstand vom Mittelpunkt der Grundfläche des Heizers nach außen hin abnimmt. Allen drei vorgenannten Ausführungsformen gemein ist, dass die Erzeugung der als vorteilhaft erkannten, leicht konvexen Phasengrenze erleichtert wird.

Ferner ist bevorzugt, wenn die Heizer-Magnet-Spiralen einen Kühlkanal aufweisen. Hierdurch kann die Temperatur in dem Bodenheizer wesentlich schneller und zuverlässiger eingestellt werden.

Alternativ oder ergänzend sind die Heizer-Magnet-Segmente vorzugsweise in einem von einem Kühlmittel durchströmbaren Gehäuse angeordnet. Gemäß dieser Ausführungsform ist demnach vorgesehen, die einzelnen Segmente in einem gemeinsamen Gehäuse anzuordnen, das wiederum von einem Kühlmittel durchströmt wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung liegt in der Bereitstellung eines Kristallisationsverfahrens zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist. Das Verfahren umfasst die Verfahrenschritte:

(i) Bereitstellen der zuvor beschriebenen Kristallisationsanlage;

(ii) Beschicken des Containers mit dem zu verarbeitendem Material und Schmelzen des Materials mit Hilfe des Heizer-Magnet-Moduls;

(iii) Nach Erreichen des Schmelzzustandes, Einleiten der Kristallisation vom Boden des Containers durch Abkühlen der Schmelze; und

(iv) Während der Kristallisation, Erzeugen wenigstens eines Karussell-Magnetfeldes (KMF) durch sequentielle Belegung der Heizer-Magnet-Spiralen mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung, derart, dass eine Kristallisationsfront der Schmelze mit (leicht) konvexer Kontur entsteht.

Zur Erzeugung des erfindungsgemäß gewünschten Karussell-Magnetfeldes sind verschiedene Einflussgrößen zu beachten, auf die nachfolgend näher eingegangen wird:

Zunächst ist die Geometrie und relative Lage der einzelnen Segmente in dem Heizer zu beachten. Die Segmente werden dabei in der Regel derart sequentiell angesteuert, dass sie ein zirkulierendes magnetisches Wanderfeld in der Schmelze erzeugen.

Die Frequenz beeinflusst signifikant die Eindringtiefe und –stärke der Lorentzkräfte; es ist auch eine Beeinflussung der Richtung der Lorentzkräfte möglich. Bei der Verwendung von hohen Frequenzen nimmt die Eindringtiefe ab und die Intensität der Lorentzkräfte und der Neigungswinkel der Lorentzkraft zur Windungsoberfläche nehmen zu. Kleine Frequenzen (für Silizium $f < 10$ Hz) sind zur Vermeidung einer niederfrequenten Schwingungsbewegung der Phasengrenze zu vermeiden. Die Wahl der Frequenz hängt weiterhin von der elektrischen Leitfähigkeit der Schmelze ab und damit auch von der gewünschten Eindringtiefe. Bevorzugte Frequenzen für den Bodenheizer liegen so tief wie möglich, zum Beispiel bei 10 bis 20 Hz für Silizium, um die Eindringtiefe zu erhöhen. Für Deckenheizer ist in diesem Fall die Frequenz wesentlich höher vorzugeben, zum Beispiel etwa 200 Hz für Silizium, um eine zu hohe Eindringtiefe zu vermeiden, um Verunreinigungen nicht in Richtung der Phasengrenze zu drücken. Bei elektrisch schlecht leitenden Schmelzen sollte die Eindringtiefe durch Vorgabe der Frequenz des Bodenheizers nicht höher als die Höhe der Schmelze sein. Bei Deckenheizern sollte die Frequenz in diesen Fällen so vorgegeben werden, dass die Eindringtiefe etwa 10 % der Schmelzhöhe beträgt. Mit dem Fortlaufen der Kristallisationsfront kann die Frequenz des Bodenheizers herabgesetzt werden beziehungsweise die Frequenz des Deckenheizers gesteigert werden. Die einzelnen Segmente des Bodenheizers werden vorzugsweise mit der gleichen Frequenz oder mit einer von den inneren Segmenten nach außen hin ansteigenden Frequenz belegt.

Die Phasenverschiebung beeinflusst die Lorentzkraftintensität nur relativ schwach (schwach bei kleinen Frequenzen, aber der Einfluss der Phasenverschiebung verstärkt sich bei

größeren Frequenzen). Der Einfluss der Phasenverschiebung auf die Richtung der Lorentzkräfte ist jedoch signifikant. Mit steigender Phasenverschiebung nimmt die Intensität ab, wobei das Optimum von der Frequenz abhängt. In der Regel sollte die Phasenverschiebung derart vorgegeben werden, dass die resultierende Lorentzkraft senkrecht zum Containerboden oder mit einer leichten Neigung zur zentralen vertikalen Achse der Schmelze steht. Durch entsprechende Vorgaben der Phasenverschiebung beziehungsweise Ausrichtung der Lorentzkraft kann die Laufrichtung der erzeugten magnetischen Wanderfelder beeinflusst werden.

Die Stromamplitude bestimmt unmittelbar die Lorentzkraftintensität; mit steigender Amplitude nimmt die Lorentzkraft stark zu. Die Lorentzkraft sollte höher liegen als die Auftriebskraft in der Schmelze.

Die Spiralengeometrie beeinflusst die Lorentzkraftintensität und -verteilung stark. Mit zunehmendem Abstand zwischen der Windung und dem Containerboden nimmt die Intensität ab. Eine Optimierung der Lorentzkraft in der z-Achse der Schmelze (mittig) kann beispielsweise derart erreicht werden, dass der Abstand zwischen den Windungen und dem Containerboden mittig am geringsten ist. Bei Deckenheizern besitzen die Heizer-Magnet-Spiralen vorzugsweise dieselbe Querschnittsfläche parallel über den gesamten Bereich des Containerbodens. Bei Bodenheizern sind Ausführungsformen bevorzugt, bei denen die Querschnittsfläche von innen nach außen zunimmt oder ein Abstand der Heizer-Magnet-Spiralen von innen nach außen zunimmt.

Kurzbeschreibung der Figuren

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Zeichnungen und eines Ausführungsbeispiels näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Schnittansicht durch eine Kristallisationsanlage mit Deckenheizer, Container und Bodenheizer;

Figur 2 eine Draufsicht auf einen Bodenheizer, der aus vier Heizer-Magnet-Segmenten in Spiralausführung besteht, sowie Schnittansichten zu drei Ausführungsformen dieses Bodenheizers;

Figur 3 eine schematische Darstellung von Heizer-Magnet-Spiralwindungen, die einen Kühlkanal aufweisen;

Figur 4 eine schematische Schnittansicht durch eine Kristallisationsanlage, bei der die Segmente in einem mit einem Kühlmittel durchströmbaren Gehäuse angeordnet sind;

Figur 5 bis 14 verschiedene Ausführungsformen von Boden- beziehungsweise Deckenheizern mit drei oder mehr Segmenten in Spiralformen.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung

Figur 1 zeigt in stark schematisierter Art und Weise eine Schnittansicht durch eine Kristallisationsanlage in einer ersten Ausführungsform der Erfindung. Die Kristallisationsanlage umfasst einen Container 8 zur Aufnahme einer Schmelze 10. Oberhalb des Containers 8 ist ein Deckenheizer angeordnet, der aus insgesamt vier Heizer-Magnet-Segmenten mit quadratischer Kontur besteht. In der Schnittansicht sind nur die beiden Segmente 3c, 4c zu erkennen. Auf die Ausgestaltung des Deckenheizers wird nachfolgend noch näher eingegangen werden.

Die in Figur 1 dargestellte Kristallisationsanlage umfasst ferner einen Bodenheizer, der wiederum aus vier Heizer-Magnet-Segmenten mit jeweils quadratischer Kontur zusammengesetzt ist. In der Schnittansicht sind nur zwei Segmente 3a, 4a des Bodenheizers dargestellt.

Durch allmähliches Abkühlen der Schmelze 10 wächst ausgehend vom Containerboden ein Kristall 11 an. Die Kristallisationsfront soll dabei eine möglichst leicht konvexe Kontur besitzen, wie es schematisch dargestellt ist. Durch den Decken- beziehungsweise Bodenheizer werden zwei Karussell-Magnetfelder KMF_A und KMF_B induziert.

In Figur 2 ist zunächst im oberen Teil eine schematische Draufsicht dargestellt, die sowohl für den in Figur 1 dargestellten Deckenheizer als auch für den in Figur 1 dargestellten Bodenheizer zutreffend ist. Die Heizer bestehen aus vier spiralförmigen Segmenten 1, 2, 3, 4, deren unterschiedliche Kontur anhand der Schnitte entlang der Linien A, B, C nun näher erläutert wird.

Rechts unten in der Figur 2 sind die verschiedenen Schnitte durch den Deckenheizer dargestellt. Wie ersichtlich, ist die Querschnittsfläche und Neigung im Bereich des Deckenheizers konstant.

Links unten in der Figur 2 sind drei Schnittansichten durch einen Bodenheizer, wie er in Figur 1 dargestellt ist, illustriert. Wie ersichtlich, nimmt dabei eine Querschnittsfläche der Heizer-Magnet-Spiralen in den einzelnen Segmenten 1, 2, 3, 4 von innen nach außen zu.

Alternativ kann der Bodenheizer jedoch auch - wie mittig unten in Figur dargestellt und mit dem Bezugszeichen 1b, 3b, 4b versehen - ausgelegt werden. Hier weisen die Heizer-Magnet-Spiralen der einzelnen Segmente 1 bis 4 einen variierenden Abstand zum Containerboden auf, wobei der Abstand von der Containermitte hin zum Rand des Bodenheizers zunimmt.

In Figur 3 sind stark schematisiert Querschnitte durch Heizer-Magnet-Spiralwindungen dargestellt, die einen Kühlkanal aufweisen. Die Heizer-Magnet-Spiralen können dabei zweiteilig aus U-förmigen Elementen 5a bis 7a beziehungsweise 5b bis 7b zusammengesetzt sein, die durch ein geeignetes Fügeverfahren zusammengesetzt werden. Durch den entstehenden Kühlkanal kann ein Kühlmedium, zum Beispiel Argon, geleitet werden.

Figur 4 illustriert schematisch eine weitere Ausführungsform der Kristallisationsanlage, bei der alle Segmente des Bodenheizers in einem gemeinsamen Gehäuse 9 untergebracht sind, das von einem geeigneten Kühlmittel durchströmt wird.

In den Figuren 5 bis 14 sind zahlreiche Varianten zur Ausgestaltung des Boden- beziehungsweise Deckenheizers zu entnehmen, bei denen Anzahl und Kontur der einzelnen Segmente variiert.

Figur 5 zeigt einen Bodenheizer aus drei Segmenten 12 bis 14, wobei das Segment 12 eine pentagonale Form und die beiden verbleibenden Segmente 13, 14 eine unregelmäßige viereckige Form aufweisen. Die auf den Segmenten 12 bis 14 aufgebrachten Spulen folgen der Kontur der Segmente 12 bis 14. Jede dieser Spulen wird beispielsweise mit gleicher Frequenz und Amplitude, jedoch phasenverschoben angesteuert, um das Karussell-Magnetfeld KMF zu erzeugen. Die dargestellte Ausführungsform eignet sich insbesondere für rechteckige Container.

Figur 6 zeigt ebenfalls einen Heizer mit drei Segmenten 19 bis 21, deren Formgebung jedoch identisch ist und Kreissegmenten entsprechen, die zusammengesetzt eine kreisförmige Grundfläche des Heizers bilden. Die dargestellte Konfiguration eignet sich insbesondere für zylindrische Container. Eine Ansteuerung der einzelnen Segmente 19 bis 21 kann analog zu Figur 5 erfolgen.

Figur 7 zeigt schematisch einen weiteren Heizer mit vier Segmenten 22 bis 25, der insbesondere für zylindrische Container geeignet ist.

Figur 8 illustriert einen weiteren Heizer mit insgesamt neun quadratischen Segmenten 26 bis 34. Der Heizer ist für rechteckige Container geeignet.

Auch die in den Figuren 9 und 10 dargestellten Heizer besitzen eine quadratische Grundfläche. Bei der in Figur 9 dargestellten Ausführungsform sind die inneren vier Segmente 43 bis 46 quadratisch. Die inneren Segmente 43 bis 46 werden von mittleren Segmenten 39 bis 42 umgeben, die wiederum von vier äußeren Segmenten 35 bis 38 umfasst werden. Die inneren, mittleren und äußeren Segmente werden unabhängig voneinander angesteuert, dass heißt, sie können in Frequenz, Amplitude und Phase variieren. Die entstehenden Karussell-Magnetfelder KMF_A, KMF_B, KMF_C können, wie dargestellt, gegenläufig rotieren.

Figur 10 zeigt einen Bodenheizer mit insgesamt 36 Segmenten 47 bis 82, wobei die inneren Segmente 79 bis 82, die mittleren Segmente 67 bis 78 und die äußeren Segmente 47 bis 66 separat voneinander derart geschaltet werden, dass wiederum drei Karussell-Magnetfelder KMF_A, KMF_B, KMF_C in der Schmelze induziert werden.

Figur 11 zeigt eine Variante eines Heizers mit vier Segmenten 83 bis 86, die zusammengesetzt eine kreisförmige Grundfläche für einen zylindrischen Container bereitstellen.

Figur 12 illustriert eine weitere Variante eines Heizers mit kreisförmiger Grundfläche, der für einen zylindrischen Container geeignet ist. Die inneren Segmente 93 bis 95, die mittleren Segmente 90 bis 92 und die äußeren Segmente 87 bis 89 können getrennt angesteuert werden, so dass sich drei Karussell-Magnetfelder KMF_A, KMF_B, KMF_C in der Schmelze mit unterschiedlicher Orientierung bilden.

Figur 13 illustriert schematisch einen weiteren Heizer mit kreisförmiger Grundfläche, der für zylindrische Container geeignet ist. Der Heizer weist insgesamt zwölf Segmente 96 bis 107 auf, die in gleicher Weise, wie in Figur 12 beschrieben, angesteuert werden.

Figur 14 zeigt eine Variante eines Heizers mit quadratischer Grundfläche. Die inneren Segmente 12 bis 15 bilden zusammengesetzt einen Kreis, während die äußeren Segmente 108 bis 111 so ausgelegt sind, dass insgesamt die gewünschte quadratische Grundfläche entsteht.

Patentansprüche

1. Kristallisationsanlage zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist, umfassend:

   - einen Container (8) zur Aufnahme einer Schmelze (10) des Materials;
   - ein Heizer-Magnet-Modul, das

     a) einen unterhalb des Containers (8) angeordneten Bodenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten (1...4) angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente (1...4) zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers (8) und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Bodenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Bodenheizers besitzen;

     und/oder

     b) einen oberhalb des Containers (8) angeordneten Deckenheizer mit einer Vielzahl von in 3 oder mehr Heizer-Magnet-Segmenten (1...4) angeordneten Heizer-Magnet-Spiralen umfasst, wobei die Heizer-Magnet-Segmente (1...4) zusammengesetzt eine zum Beheizen des Containers (8) und zur Erzeugung von magnetischen Feldern bereitstehende Grundfläche des Deckenheizers bilden, jedoch keinen gemeinsamen geometrischen Mittelpunkt in der Grundfläche des Deckenheizers besitzen; und
   - eine Steuer- und Stromversorgungseinheit, mit der die Heizer-Magnet-Segmente (1...4) separat mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung belegbar sind, wobei die Steuer- und Stromversorgungseinheit ausgelegt ist, wenigstens ein Karussell-Magnetfeld (KMF) durch sequentielle Belegung der Heizer-Magnet-Segmente (1...4) mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung zu erzeugen, derart, dass eine Kristallisationsfront der Schmelze (10) mit konvexer Kontur entsteht.

2. Kristallisationsanlage nach Anspruch 1, bei der eine Querschnittsfläche einer Heizer-Magnet-Spirale innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments (1...4) vom Mittelpunkt des Containers (8) in radialer Richtung zunimmt.

3. Kristallisationsanlage nach Anspruch 1, bei der die Querschnittsflächen der Heizer-Magnet-Spiralen innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments (1...4) konstant sind und die Querschnittsflächen von Heizer-Magnet-Spiralen verschiedener Heizer-Magnet-Segmente (1...4) vom Mittelpunkt des Containers (8) in radialer Richtung zunehmen.

4. Kristallisationsanlage nach Anspruch 1, bei der die Querschnittsflächen der Heizer-Magnet-Spiralen innerhalb eines Heizer-Magnet-Segments (1...4) konstant sind und die Heizer-Magnet-Spiralen derart im Heizer-Magnet-Segment (1...4) angeordnet sind, dass ein Abstand der Heizer-Magnet-Spiralen zum Container (8) vom Mittelpunkt des Containers in radialer Richtung zunimmt.

5. Kristallisationsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Heizer-Magnet-Spiralen einen Kühlkanal aufweisen.

6. Kristallisationsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Heizer-Magnet-Segmente (1...4) in einem von einem Kühlmittel durchströmbaren Gehäuse (9) angeordnet sind.

7. Kristallisationsverfahren zur Herstellung eines Blocks aus einem Material, dessen Schmelze elektrisch leitend ist, umfassend die Verfahrenschritte:

   (i) Bereitstellen einer Kristallisationsanlage nach einem der Ansprüche 1 bis 6.

   (ii) Beschicken des Containers (8) mit dem zu verarbeitendem Material und Schmelzen des Materials mit Hilfe des Heizer-Magnet-Moduls;

   (iii) Nach Erreichen des Schmelzzustandes, Einleiten der Kristallisation vom Boden des Containers (8) durch Abkühlen der Schmelze; und

   (iv) Während der Kristallisation, Erzeugen wenigstens eines Karussell-Magnetfeldes (KMF) durch sequentielle Belegung der Heizer-Magnet-Segmente mit einer vorgebbaren Stromstärke, Frequenz und Phasenverschiebung, derart, dass eine Kristallisationsfront der Schmelze mit konvexer Kontur entsteht.

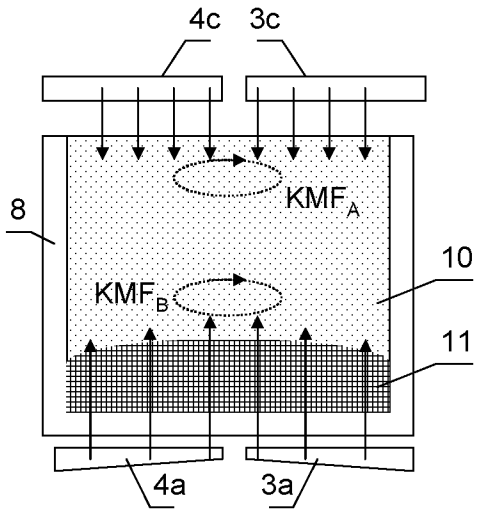

4c
3c
8
KMF$_A$
10
KMF$_B$
11
4a
3a

Fig. 1

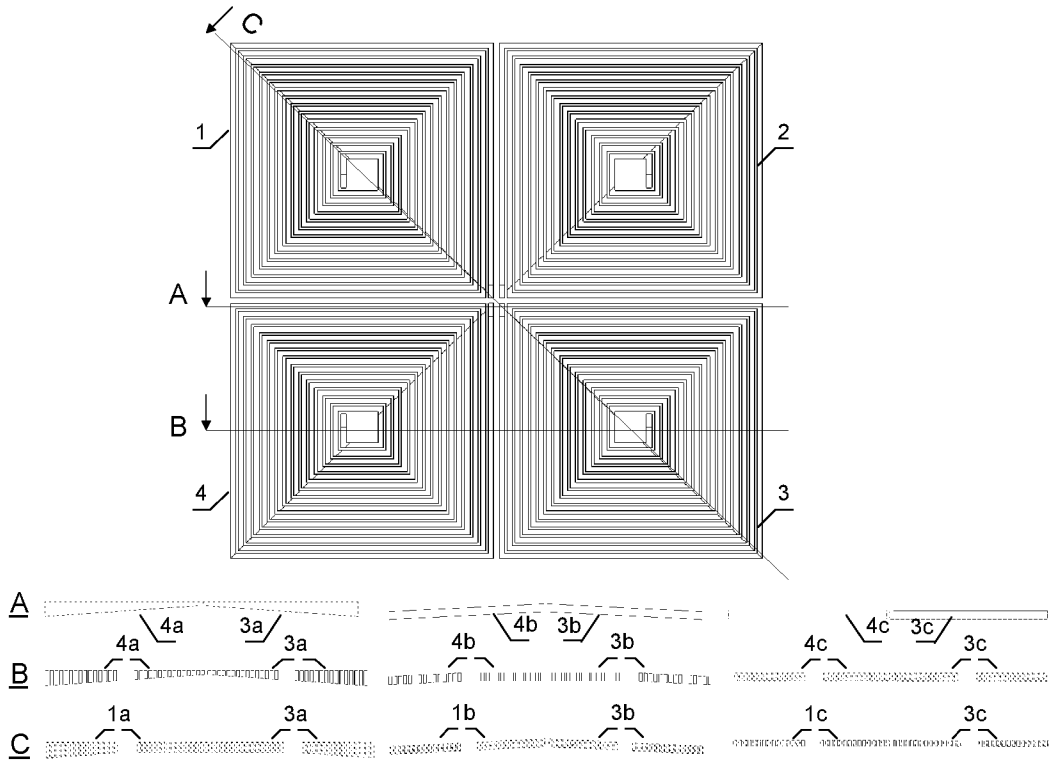

C
1
2
A
B
4
3
A
4a
3a
4b
3b
4c
3c
B
4a
3a
4b
3b
4c
3c
C
1a
3a
1b
3b
1c
3c

Fig. 2

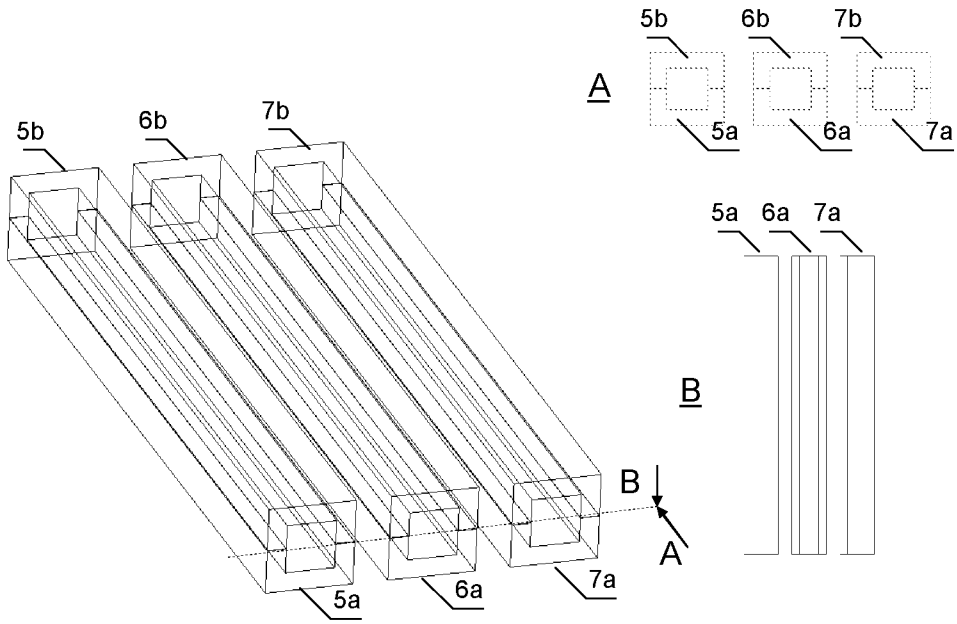


Fig. 3

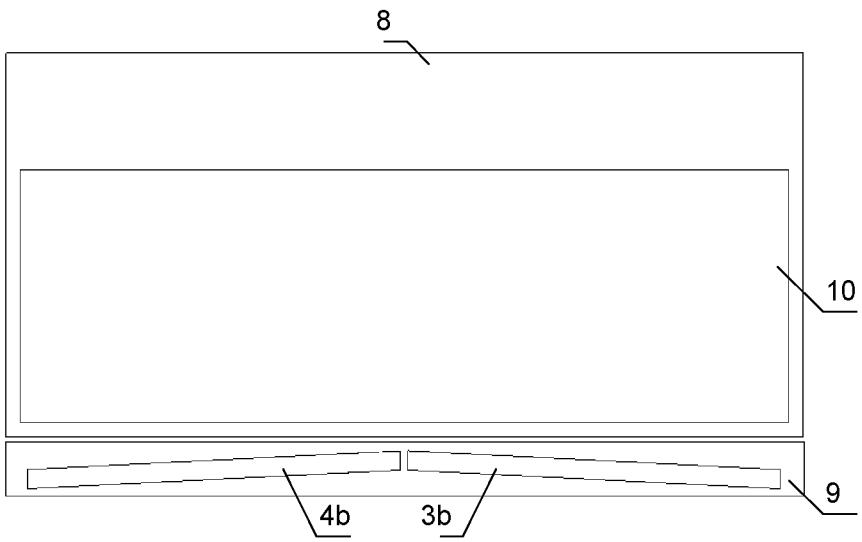


Fig. 4

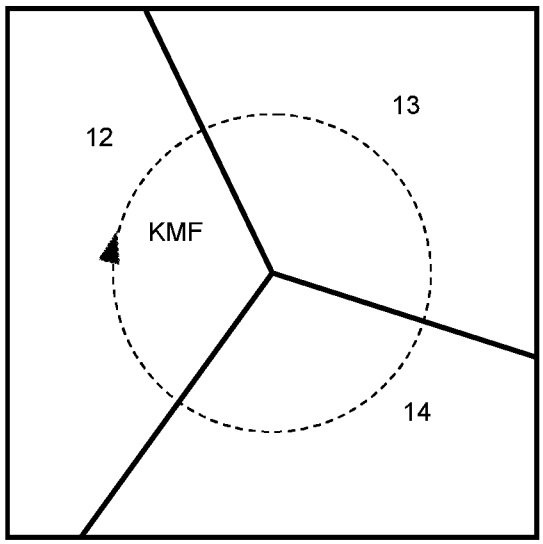


Fig. 5

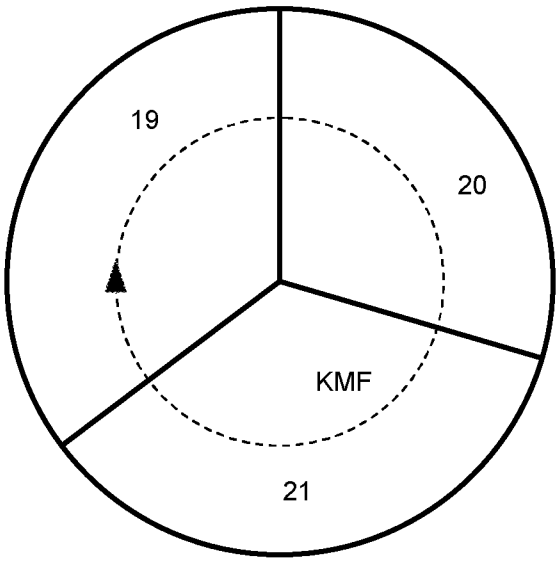


Fig. 6

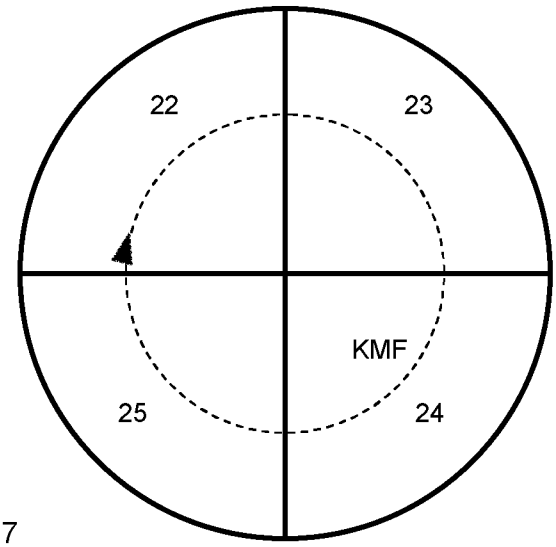


Fig. 7

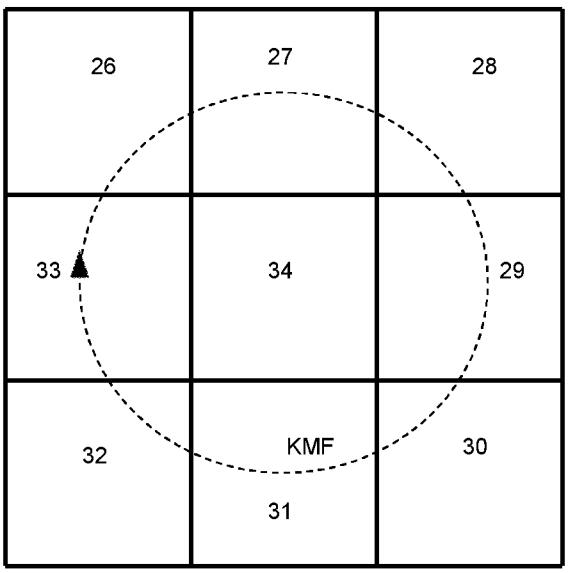


Fig. 8

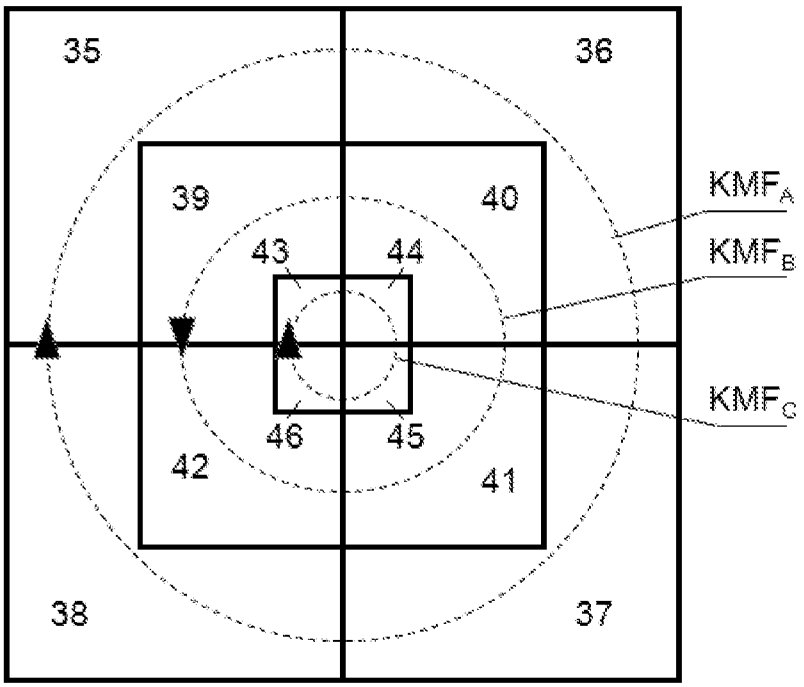

35
36
39
40
43
44
46
45
42
41
38
37
KMF_A
KMF_B
KMF_C

Fig. 9

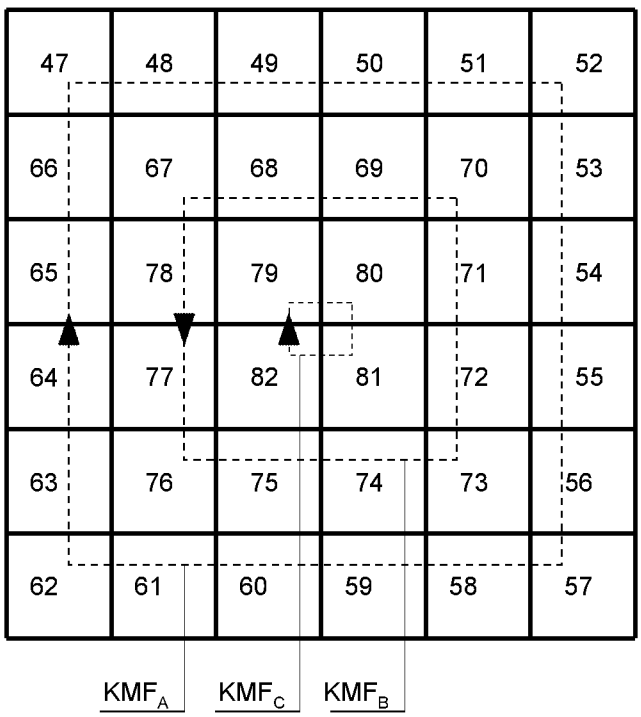

47
48
49
50
51
52
66
67
68
69
70
53
65
78
79
80
71
54
64
77
82
81
72
55
63
76
75
74
73
56
62
61
60
59
58
57
KMF_A
KMF_C
KMF_B

Fig. 10

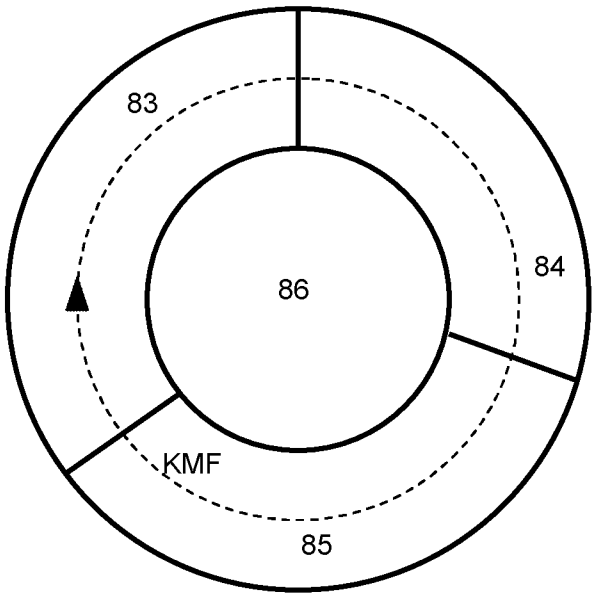


Fig. 11

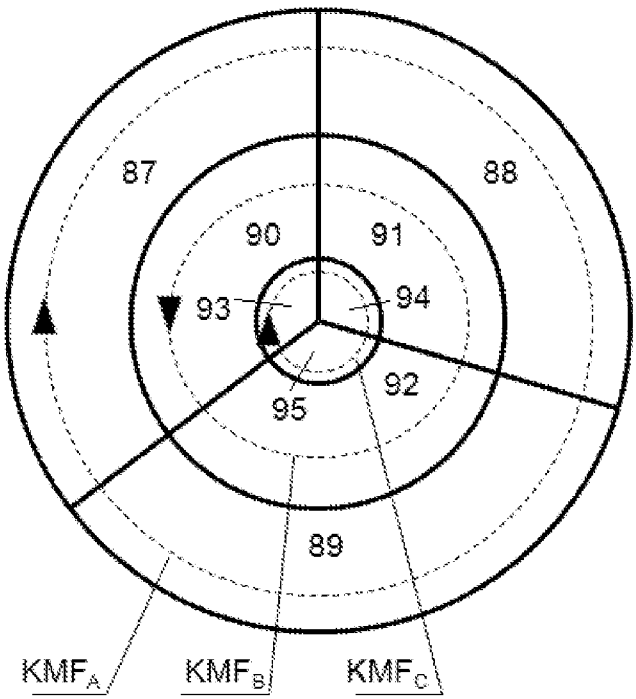


Fig. 12

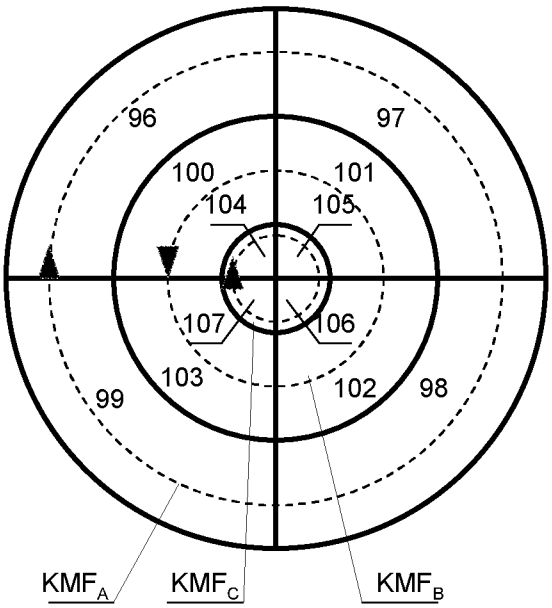

96
97
100
101
104
105
107
106
103
102
98
99
KMF_A
KMF_C
KMF_B

Fig. 13

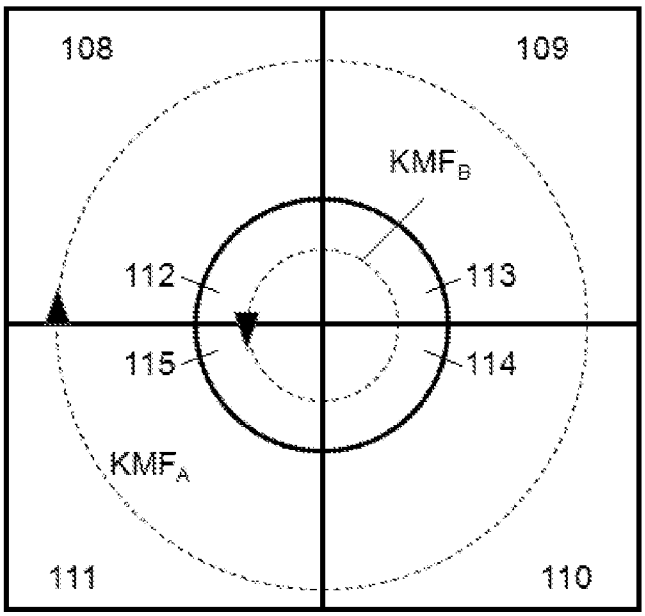

108
109
KMF_B
112
113
115
114
KMF_A
111
110

Fig. 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2011/066332

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. C30B11/00 C30B30/04 C30B28/06 H01L31/18 C30B35/00
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
C30B H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DUGHIERO F ET AL: "A new DSS furnace for energy saving in the production of multi-crystalline Silicon", 35TH IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 20-25 JUNE 2010, HONOLULU, HI [US], 20 June 2010 (2010-06-20), pages 2165-2170, XP031785393, IEEE, PISCATAWAY, NJ [US] ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5615883 ISBN: 978-1-4244-5890-5 figure 4 ----- -/--	1-7

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
18 November 2011	29/11/2011

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Hoyer, Wolfgang

2

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 854 209 A1 (WACKER SILTRONIC GESELLSCHAFT FÜR HALBLEITERMATERIALIEN [DE]) 22 July 1998 (1998-07-22) column 3, line 47 - column 4, line 26; figure 1	1-7
A	WO 2008/148542 A1 (FREIBERGER COMPOUND MAT GMBH [DE]; EICHLER STEFAN [DE]; BÜNGER THOMAS) 11 December 2008 (2008-12-11) page 18, lines 5-21; figure 10	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2011/066332

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0854209 A1	22-07-1998	DE 19652543 A1	18-06-1998
		EP 0854209 A1	22-07-1998
		JP 3094156 B2	03-10-2000
		JP 10194891 A	28-07-1998
		SG 64453 A1	27-04-1999
		TW 480294 B	21-03-2002
		US 6117230 A	12-09-2000
WO 2008148542 A1	11-12-2008	CN 101772596 A	07-07-2010
		DE 102007026298 A1	11-12-2008
		EP 2106465 A1	07-10-2009
		JP 2010528964 A	26-08-2010
		US 2008311417 A1	18-12-2008
		WO 2008148542 A1	11-12-2008

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2011/066332

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. C30B11/00 C30B30/04 C30B28/06 H01L31/18 C30B35/00
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
C30B H01L

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DUGHIERO F ET AL: "A new DSS furnace for energy saving in the production of multi-crystalline Silicon", 35TH IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 20-25 JUNE 2010, HONOLULU, HI [US], 20. Juni 2010 (2010-06-20), Seiten 2165-2170, XP031785393, IEEE, PISCATAWAY, NJ [US] ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5615883 ISBN: 978-1-4244-5890-5 Abbildung 4 ----- -/--	1-7

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
18. November 2011	29/11/2011

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Hoyer, Wolfgang

2

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 0 854 209 A1 (WACKER SILTRONIC GESELLSCHAFT FÜR HALBLEITERMATERIALIEN [DE]) 22. Juli 1998 (1998-07-22) Spalte 3, Zeile 47 - Spalte 4, Zeile 26; Abbildung 1	1-7
A	WO 2008/148542 A1 (FREIBERGER COMPOUND MAT GMBH [DE]; EICHLER STEFAN [DE]; BÜNGER THOMAS) 11. Dezember 2008 (2008-12-11) Seite 18, Zeilen 5-21; Abbildung 10	1-7

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2011/066332

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0854209 A1	22-07-1998	DE 19652543 A1	18-06-1998
		EP 0854209 A1	22-07-1998
		JP 3094156 B2	03-10-2000
		JP 10194891 A	28-07-1998
		SG 64453 A1	27-04-1999
		TW 480294 B	21-03-2002
		US 6117230 A	12-09-2000
WO 2008148542 A1	11-12-2008	CN 101772596 A	07-07-2010
		DE 102007026298 A1	11-12-2008
		EP 2106465 A1	07-10-2009
		JP 2010528964 A	26-08-2010
		US 2008311417 A1	18-12-2008
		WO 2008148542 A1	11-12-2008